

機関番号：13101
 研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2008 ～ 2010
 課題番号：20560261
 研究課題名 (和文) 高温超伝導電力ケーブルの交流損失最小化に基づく最適化設計の研究
 研究課題名 (英文) Study of Optimization Design of HTS Power Transmission Cable Based on AC Loss Minimization
 研究代表者
 福井 聡 (FUKUI SATOSHI)
 新潟大学・自然科学系・准教授
 研究者番号：70293199

研究成果の概要 (和文)：

本研究ではまず、多層スパイラル導体の交流損失の電氣的測定法の開発を行った。Bi 系線材を用いた通電 4 層・シールド 2 層のスパイラルケーブル導体を用いて行った測定結果と理論解析結果を比較したところ、両者は良く一致し、測定手法の妥当性を検証できた。本測定方法を用いて、線材間ギャップや線材本数を変化させた Y 系小型モデルケーブルを数種類試作し、交流損失特性を測定した。理論解析モデルにより、測定したモデルケーブルの交流損失特性を良く説明できることが分かった。理論解析モデルに基づき、交流損失と線材間ギャップ等のパラメータとの関係を系統的に整理し、交流損失の大幅な低減に対する指針を得ることができた。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, an electric measurement method of AC losses in multi-layer spiral cables was developed. The measurement method was applied to measure the AC loss in the 4-layer spiral cable with 2-layer shield conductor made by Bi-2223 HTS tapes. The measured data were compared with the numerically calculated AC losses and the good agreement was confirmed. Several short model cables made by Y-123 HTS tapes were fabricated by changing tape-to-tape gap width and number of tapes. The AC losses in these short model cables were measured and compared with the numerical data. It is confirmed that the measured AC loss dependences on tape-to-tape gap width and tape numbers were clearly explained by the numerical model. Based on the numerical model, the relationship between the AC loss in the multilayer cable made by Y-123 HTS tapes and the cable geometrical parameters were systematically investigated. Among this study, the useful knowledge for the AC reduction was obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気エネルギー工学、高温超伝導送電ケーブル

1. 研究開始当初の背景

送電ケーブルや交流電力機器への応用を

目指した酸化物高温超伝導線材の開発は、これまでビスマス系銀シース線材及びイットリウム系薄膜線材（以下、それぞれ Bi 系線

材, Y系線材という)を中心に行われてきた。Bi系線材では線材製造基盤は確立されており, またY系線材でも国家プロジェクトの牽引により著しく線材技術が進歩してきている。一方, 超伝導体は, 交流で使用すると特有の損失(交流損失)を発生する。交流損失は送電システムの最終効率に直接影響し, 冷却容量や超伝導化のメリットを大きく左右する。高温超伝導を実用規模の電力ケーブルに適用するには, 日本の電力事情を考慮すると, 交流損失の最小化は最も重要な課題である。このような導体では, 各相導体の超伝導線材は, 自己磁界・シールド磁界及び他相電流の磁界が複合した, 極めて複雑な電磁環境に曝されるので, 同一の線材を使用してもケーブル導体の形状構成により損失特性が大きく異なる。従って, 超伝導磁気シールドを含めたケーブル導体の損失特性・導体構造を関連付け, 交流損失最小化を目的とした最適化設計手法の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究では, 高温超伝導大容量ケーブル導体に主たる焦点を絞り, 交流損失メカニズムに基づいた大幅な損失低減手法の開発に特化した研究を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために, 以下の項目について研究を行った。

- (1) 多層スパイラルケーブルの交流損失の電気的測定法の開発
- (2) Y系モデルケーブルの交流損失の測定と数値解析による検証
- (3) Y系2層ストレートケーブルの交流損失と導体構成パラメータとの関係
- (4) Y系2層スパイラルケーブルの交流損失と導体構成パラメータとの関係

4. 研究成果

(1) 多層スパイラルケーブルの交流損失の電気的測定法の開発

① 測定方法 : 図1に本研究で用いた超伝導ケーブルの模式図を示す。測定に用いたサンプルは4層の通電導体(内層)と2層のシールド導体(外層)で構成され, 各層間は絶縁されている。図1に示すように, 円筒フォーマ上に高温超伝導テープ線材を多層同軸構造に巻きつけたものである。主絶縁をはさんで, 内側が通電導体であり, 外側がシールド導体である。実際に超伝導ケーブルを運用する場合には, シールド導体は両端で設置され大地を介して短絡されるのでシールド導体は通電導体に流れる通電電流と大きさ

が同じで, 逆向きの電流が流れる。これにより, 通電電流の作る磁界を遮蔽してケーブル外部へ影響しないようにする。しかしながら, 実験室レベルの測定において上記通電環境を実現することは困難である。そこで, 本測定では, 通電導体とシールド導体の片端を短絡して, 通電導体とシールド導体の他方の淵から通電して往復電流を流すことによりこの状態を模擬する。図2に通電方法と電圧タップ配置を示す。A, B, C, Dは電圧タップの取り付け位置を示す。図1に示す構造のケーブルでは, 通電導体及びシールド導体の各超伝導層間は, 電磁的に強く結合しているため各層間でエネルギーの授受が起こる。従って, 各超伝導層に発生する交流損失を個別に測定することは事実上不可能である。よって本測定では AD-BC 間に発生する全損失を測定することにする。図2に示すように, 通電導体に流れる電流はシールド導体周囲に同方向磁界を発生し, それによりシールド導体に付加的な損失 Q'_{C-S} が発生する。これは通電導体に流れる交流電流から供給されるので, AB 間の電圧に含まれる。同様にシールド導体に流れる電流は線材がスパイラル状に巻かれているので内側の通電導体付近に軸方向磁界を発生し, それにより通電導体にも付加的な損失 Q'_{S-C} が発生する。これは CD 間の電圧に現れる。AB 間及び CD 間の電圧 V_{AB} 及び V_{CD} 間から計測される損失をそれぞれ Q_{AB} と, Q_{CD} とし, AB 間内部の超伝導層に発生する損失を Q'_{AB} , CD 間内部の超伝導層に発生する損失を Q'_{CD} とすると, これらの関係は電圧の測定方向と電流の向きを考慮して, 以下のようになる。

$$Q_{AB} = V_{AB} I_t = Q'_{AB} + Q'_{C-S} - (-Q'_{S-C}) \quad (1)$$

$$Q_{CD} = V_{CD} I_t = Q'_{CD} + Q'_{S-C} - (-Q'_{C-S}) \quad (2)$$

従って, $Q_{AB} + Q_{CD}$ は正しい損失を与えないと考えられる。一方, AD (A→B→C→D) 間の電圧 V_{AD} による損失測定値 Q_{AD} は, A→B→C→D 間に供給される全電力なので,

$$Q_{AD} = V_{AD} I_t = Q'_{AB} + Q'_{CD} + Q_{BC} \quad (3)$$

$$Q_{BC} = V_{BC} I_t \quad (4)$$

となるので,

$$Q_{AD} - Q_{BC} = Q'_{AB} + Q'_{CD} = (V_{AD} - V_{BC}) I_t \quad (5)$$

となり, 差動電圧 $V_{AD} - V_{BC}$ を測定することにより, 正しい損失値を測定できると考えられる。上式より明らかのように

$$Q_{AB} + Q_{CD} > Q_{AD} - Q_{BC} = Q'_{AB} + Q'_{CD} \quad (6)$$

である。

② 測定結果 : 図3に周波数 60Hz, 測定電流をピーク値で 3000A まで流したときの Additional mode $Q_{AB} + Q_{CD}$ と Differential mode

$Q_{AD} - Q_{BC}^{def}$ の測定値の比較を示す。この結果より、Additional modeの方がDifferential modeの測定値より大きいことが分かる。この結果は式(6)の関係と一致しており、前章の理論的考察を裏付けるものと考えられる。また、数値解析の結果とも良く一致しており、測定手法の妥当性が検証できた。

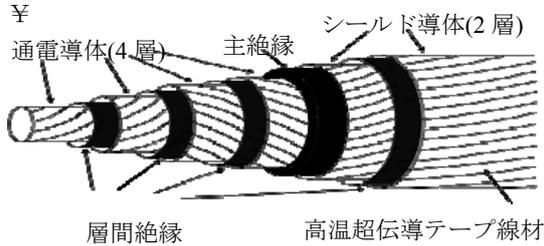


図1 多層スパイラルケーブルの模式図

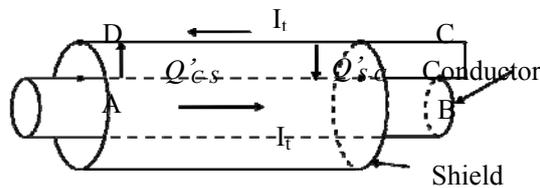


図2 通電方法と電圧タップ配置図

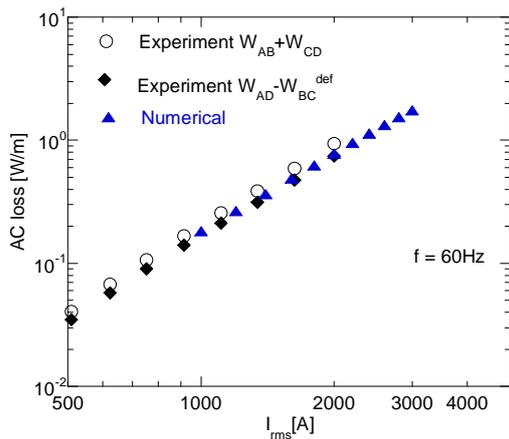


図3 Bi系多層スパイラルケーブルの交流損失測定結果と解析結果の比較

(2) Y系モデルケーブルの交流損失の測定と数値解析による検証

① 測定サンプル・測定方法 : 表1に測定に使用したYBCO線材の諸元を示す。測定に使用した線材はSuper Power社製のものである。図4に測定用サンプル導体の構造を示す。断面が5角形及び6角形状のGFRP製のフォルダ上に線材を固定する。線材間のギャップ0.2・0.5・1.0・2.0・4.0mmのそれぞれに対応するフォルダを用意する。各線材の同一の電流を流すために、電流リードは独立して接続する。電圧計測のためのスパイラルリードループは全ての線材に取りつけてい

る。各線材に取り付けたスパイラルリードループは、他の全ての線材を取り囲むように配置する。交流通電時の交流損失はロックインアンプを用いた四端子法を用いる。交流損失測定時にはサンプル導体の各線材に取り付けたリード線を直列に接続して、各線材の電流値を均一にする。この状態で、各線材のスパイラルリードループの電圧 V_n をロックインアンプを用いて計測し、交流損失を求める。

表1 測定に用いたYBCO線材の諸元

| | |
|-----------------------------|-----------|
| Tape width W | 4 mm |
| Thickness of substrate | 0.05 mm |
| Thickness of superconductor | 1 μ m |
| Thickness of Cu stabilizer | 0.04 mm |
| Thickness of Ag overlayer | 2 μ m |

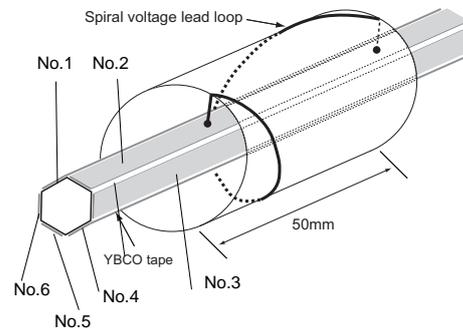


図4 サンプル導体

② 解析モデル : 図3にテープ線材を多角形に配置した場合の交流損失解析モデルを示す。導体構造パラメータは幾何学的に以下の関係を満たす。

$$\left(R_i + d_1 + \frac{d_2}{2}\right) \tan\left(\frac{\pi}{N}\right) = \frac{g_i}{2 \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)} + \frac{W}{2} \quad (7)$$

ここで、 N は線材本数、 W は線材幅、 g_i は第 i 層の線材間ギャップ、 R_i は第 i 層の内接半径、 d_1 and d_2 は線材の基盤及び超伝導層の厚さである。ケーブル導体内部の電流分布は、以下の電磁界方程式を解くことにより求めることができる。

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = -\mathbf{E} - \nabla V \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{A} 及び \mathbf{E} はそれぞれ磁界のベクトルポテンシャル及び電界のベクトルである。 ∇V はスカラーポテンシャルの勾配、つまりケーブルへの印加電圧を表す。 μ_0 は真空の透磁率である。ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_i} \mathbf{j} \cdot \ln \frac{1}{r} dS_i \quad (9)$$

と書ける。ここで、 \mathbf{j} は電流密度、 N は線材本数である。右辺の積分は、 i 番目の線材断面における面積分である。電流密度と電界の関係は、 n 値を用いた以下の式で定義する。

$$E = E_0 \left(\frac{j}{j_c} \right)^n \quad (10)$$

ここで、 j_c は $E=E_0$ における電流密度である(本解析では $E_0=10^{-4}\text{V/m}$ とする)。本解析では、 j_c の外部磁界(垂直磁界)依存性を考慮する。 j_c の外部磁界(垂直磁界)依存性は後述する測定値からフィッティング曲線を求めて用いる。

本解析では(8)、(9)式を数値解析することにより、線材内部の E, j の分布が得られる。求められた電流密度・電界分布より、交流損失 Q_s (J/m/cycle)を以下の式を用いて算出した。

$$Q_s = \int_0^T \sum_{i=1}^N \left(\int_{S_i} \mathbf{E} \cdot \mathbf{j} dS_i \right) dt \quad (11)$$

ここで、上式の積分は線材断面について行うことを意味する。

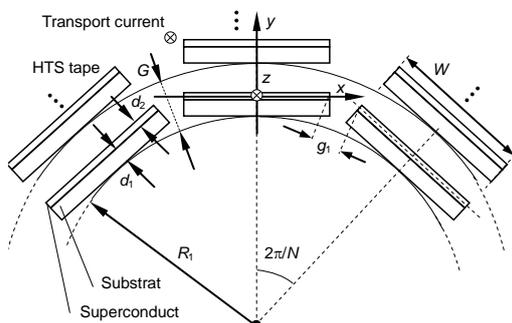


図5 Y系多層ケーブルの解析モデル

③ 測定結果と理論解析結果の比較 : 図6に測定及び解析から得られた交流損失特性を示す。線材間ギャップが小さい場合には、交流損失が大幅に減少しており、それが大きくなると Norris の理論値(線材単独の損失の本数倍)に近づく。線材間ギャップが小さくなると、ギャップ付近の自己磁界の回り込みが抑制され、線材に加わる垂直磁界成分が減少し、垂直磁界に起因する交流損失が低減されるという効果が理解できる。測定及び数値解析の結果は概ね良く一致しており、測定・解析両者の妥当性が検証できたと考えられる。

(3) Y系2層ストレートケーブルの交流損失と導体構成パラメータとの関係

① 解析方法 : 2層導体においては、外層の臨界電流を一定して、線材幅と交流損失の関係を評価することにする。解析に用いたパラメータを表2に示す。2層導体の場合、内層と外層の線材幅と線材間ギャップを同一にして、線材本数の差を2(つまり、 $N_2-N_1=2$)とする。その上で、(7)式を満たすように内層と外層の内接半径を決める。外層の臨界電流は一定になるが、内層の臨界電流は線材幅の減少に伴い増加する。このようなパラメータの相互依存性を踏まえた上

で結果を考察する。

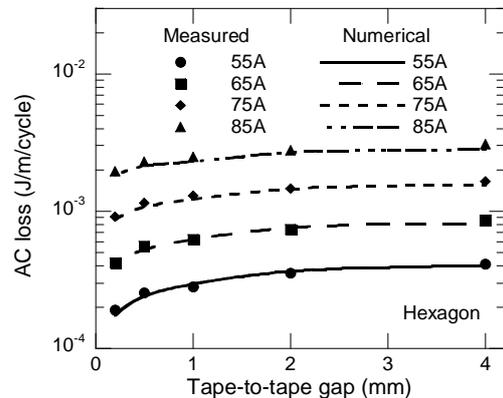
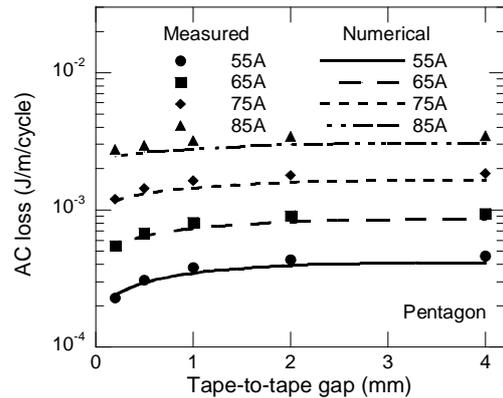


図6 サンプル導体の交流損失と線材間ギャップの関係

② 解析結果 : 図7に、交流損失の解析結果を示す。線材間ギャップが0.2mm及び0.5mmの場合ともに、線材幅が小さくなると交流損失は減少する。一般に多層導体の場合、外層の方が自己磁界は大きくなるので、外層の交流損失がかなり大きくなる。従って、線材幅を減少させて垂直磁界を低減する効果も外層で顕著になると考えられる。また、内層の臨界電流が増加するので、内層では垂直磁界の低減と負荷率の減少が交流損失低減に相乗して寄与する。しかしながら、ケーブルの外径が大きくなるので、設計上の問題となる可能性がある。例えば、線材間ギャップ0.5mmの場合、線材幅を4mmから2mmにしたとき半径が1mm程度変化してしまう。よって、線材間ギャップが大きい場合には、特に注意が必要である。

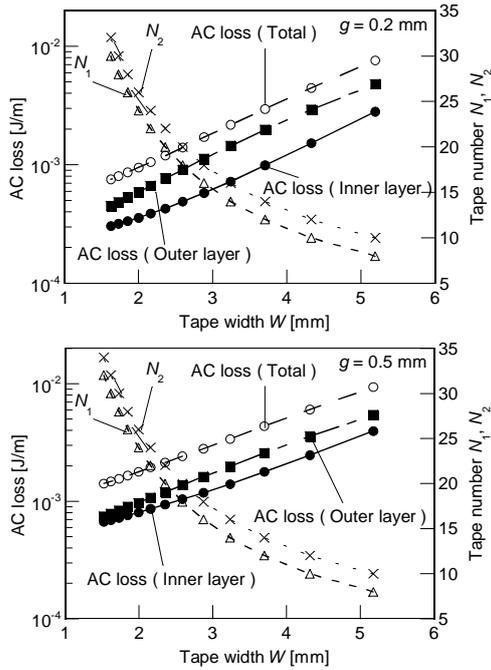


図7 Y系2層ケーブルの交流損失と
導体構造パラメータの関係

(4) Y系2層スパイラルケーブルの交流損失
と導体構成パラメータとの関係

① 解析方法 : Fig.1 にスパイラル集
合導体の交流損失解析モデルを示す。導体構
造パラメータは幾何学的に以下の関係を満
たす。

$$(R_i + d_i + \frac{d_i^2}{2}) = \frac{1}{2l_p \tan(\pi/N)} \sqrt{(2\pi R_i)^2 + l_p^2} \left(W + \frac{g_i}{\cos(\pi/N)} \right) \quad (12)$$

ここで、 N は線材本数、 W は線材幅、 g_i は
第 i 層の線材間ギャップ、 R_i 、 R_i' は第 i 層の
内接半径及び円筒中心から線材端部まで
の距離、 l_p はスパイラルピッチ、 d_1 、 d_2 は線材
の基盤及び超伝導層の厚さである。

超伝導線材内部において、以下の式が成立
する。

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = -\mathbf{E} - \nabla V \quad (13)$$

ここで、 \mathbf{A} 及び \mathbf{E} はベクトルポテンシャル及
び電解、 ∇V は電気スカラーポテンシャルの勾配
を表わす。ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は

$$\mathbf{A} = \sum_i \sum_k \left[\frac{\mu_0 |\mathbf{J}_k|}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_{k,12}}{|\mathbf{r}_{k,12}|} \int_{r_{k,1}}^{r_{k,2}} \log \frac{\mathbf{r}_{k,12} \cdot (\mathbf{r}_{k,2} - \mathbf{r}_i) + |\mathbf{r}_{k,12}| |\mathbf{r}_{k,2} - \mathbf{r}_i|}{\mathbf{r}_{k,12} \cdot (\mathbf{r}_{k,1} - \mathbf{r}_i) + |\mathbf{r}_{k,12}| |\mathbf{r}_{k,1} - \mathbf{r}_i|} d\mathbf{r}_i \right]$$

(14)

と書ける。 \mathbf{J} は電流密度、 μ_0 は真空の透磁率、
 r は導体を構成する微小線分要素である。右辺
の Σ は、線材断面全体及び導体長さ方向に十
分長い距離に渡っての数値積分を示す。また、
 n 値を用いた以下の $\mathbf{E}-\mathbf{J}$ 特性を用いる。

$$|\mathbf{E}| = E_0 \left(\frac{|\mathbf{j}|}{j_c} \right)^n \quad (15)$$

ここで、 j_c は臨界電流密度であり、 $E_0=10^{-4}\text{V/m}$
とする。(2)~(4)式を数値解析することにより、
線材内部の \mathbf{E} 、 \mathbf{j} の分布が得られる。求めら
れた電流密度・電界分布より、集合導体の交
流損失 $P_i[\text{J/m}]$ を以下の式を用いて算出する。

$$P_i = \int_0^T \sum_{i=1}^N \left(\int_{S_i} \mathbf{E} \cdot \mathbf{j} dS_i \right) dt \quad (16)$$

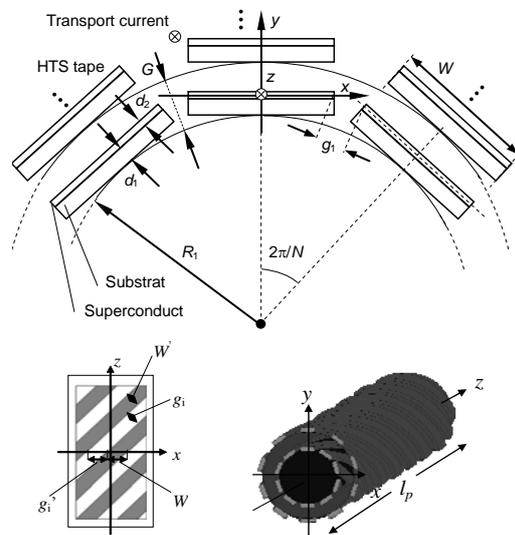


図8 Y系2層スパイラルケーブルの
解析モデル

② 解析結果 : 2層導体において、 $l_p=0.5\text{m}$ 、
外層の臨界電流 $I_{c2}=1430\text{A}$ 一定とした時の線
材幅と交流損失の関係及び線材幅と内接半
径、負荷率の関係を図9に示す。線材幅が小
さくなると交流損失は減少する。一般に多層
導体の場合、外層の方が自己磁界が大きくな
るので、線材幅を減少させて垂直磁界を低減
する効果が外層で顕著になると考えられる。
また、内層の臨界電流が増加するので、内層
では垂直磁界の低減と負荷率の減少が交流
損失低減に相乗して寄与する。

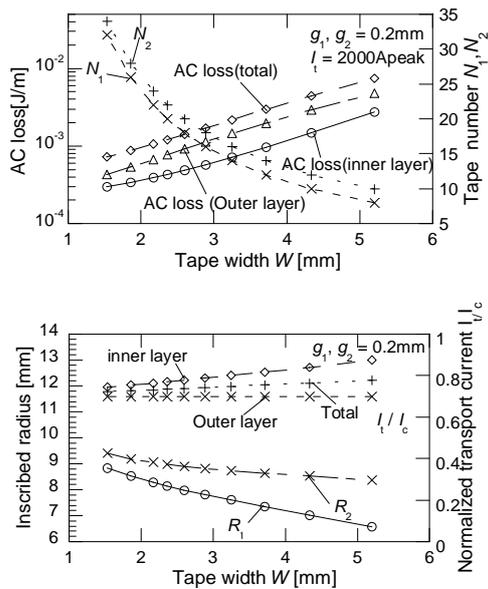


図9 Y系2層スパイラルケーブルの交流損失と導体構造パラメータの関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. S.Fukui, N.Suzuki, J.Ogawa, T.Oka, T.Sato and O.Tsukamoto, "Numerical Analysis of Relation between AC Loss Characteristics and Geometrical Parameters of Multi-layer Polygonal Conductor Assembled by HTS Coated Conductor", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.20, pp. 2138-2141, 2010.
2. S. Fukui, J. Ogawa, N. Suzuki, T. Oka, T. Sato, O. Tsukamoto, T. Takao, "Numerical Analysis of AC Loss Characteristics of Multi-Layer HTS Cable Assembled by Coated Conductors", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.19, pp. 1714-1717, 2009.

[学会発表] (計2件)

1. 福井 聡 他 6名, 「YBCO 線材を多角形配置した集合導体の交流損失特性の測定及び数値解析」, 電気学会 超伝導応用電力機器研究会, 2011年1月20日, 大阪
2. 福井 聡 他 6名, 「高温超伝導薄膜テープ線材を用いた単層及び多層集合導体の交流損失特性」, 2009年度秋季低温工学・超電導学会, 2009年11月18日, 岡山大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

福井 聡 (FUKUI SATOSHI)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 70293199

(2)研究分担者

(3)連携研究者

小川 純 (OGAWA JUN)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 60377182